

Piorun zamknięty w szklanej kuli

Kule plazmowe używane są dość często podczas pokazów popularnonaukowych ze względu na spektakularne efekty. Ci, którzy nie boją się dotknąć szklanej kuli, mogą ujrzyć niebiesko-różowe rozbłyski, podobne do małych piorunów, biegnące wprost do ich własnych dłoni. Inni, bardziej ostrożni, zastanawiają się, czy na pewno jest to bezpieczne. Czy kula plazmowa to tylko zabawka? Jaka fizyka kryje się w małej, szklanej kuli?

Plazma to obok ciała stałego, cieczy i gazu, kolejny stan skupienia substancji. Często nazywana jest czwartym stanem materii. Składa się ze zjonizowanej materii (czyli atomów rozbitych na jony i elektrony) oraz promieniowania w postaci fal elektromagnetycznych (czyli np. światła). Plazma odegrała i w dalszym ciągu odgrywa ważną rolę w tworzeniu Wszechświata. W początkowym stadium jego istnienia, gdy był on jeszcze bardzo gorący, w ogóle nie istniały atomy, a nawet jądra atomowe! W tak zwanej erze promieniowania (która nastąpiła po około 1 sekundzie po Wielkim Wybuchu) ujemnie naładowane elektrony, dodatnio naładowane protony i elektrycznie obojętne neutrony, a także neutrino współistniały w równowadze z promieniowaniem elektromagnetycznym. W tym też okresie zaczęły się tworzyć pierwsze jądra atomowe i dopiero pod koniec tej ery powstały pierwsze atomy. Zatem cały Wszechświat był w pewnym momencie w stanie plazmy. Obecnie plazma jest również bardzo powszechna we Wszechświecie (stanowi ok. 99% jego materii), ale nie wypełnia go równomiernie, a jedynie skupiona jest w gwiazdach w postaci tzw. plazmy gorącej, składającej się z naładowanych i obojętnych cząstek elementarnych oraz w pełni zjonizowanych jąder atomowych. Ze względu na bardzo wysoką temperaturę tych gwiazd, w plazmie gorącej brakuje jednak atomów neutralnych. Tak więc nazywanie plazmy czwartym stanem skupienia można uznać za krzywdzące, niewątpliwie jest to pierwszy stan skupienia!

Kula plazmowa to sfera wykonana ze szkła, oparta na podstawie wyposażonej w kabel umożliwiający podłączenie urządzenia do gniazdka elektrycznego. Wewnątrz sfery znajduje się gaz (np. neon, argon, ksenon, krypton) pod ciśnieniem około 10 razy mniejszym od ciśnienia atmosferycznego. W centralnej części sfery znajduje się elektroda, która po podłączeniu podstawy do prądu uzyskuje bardzo wysokie napięcie zmienne o amplitudzie pomiędzy 2 kV a 5 kV i dużej częstotliwości (najczęściej 35 kHz). Centralna elektroda kuli plazmowej jest tak zwany **transformatorem Tesli**, produkującym zmienne pole elektryczne, które rozchodzi się nie tylko w samej kuli, ale także daleko poza nią. Towarzyszy mu zmienne pole magnetyczne, a intensywność obu pól maleje wraz z odległością od elektrody. Wynikiem pojawienia się pola elektrycznego jest przyspieszanie swobodnych elektronów wewnątrz kuli. Takie swobodne elektrony, choć w małej ilości, znajdują się w gazie nawet wtedy, gdy urządzenie jest wyłączone. Przyspieszane elektrony rozpędzają się tak, że uzyskana przez nie energia kinetyczna może



Fot. Tomasz Zawadzki

wystarczyć do zjonizowania innego atomu, z którym elektron się zderzy. Taki atom zostanie również wzbudzony, czyli przejdzie na wyższy poziom energetyczny. Wracając na niższy poziom, atom wyemituje promieniowanie, które obserwujemy jako świecenie plazmy. Ponieważ pole elektromagnetyczne rozchodzi się promieniście, ścieżki plazmy także powstają w układzie mniej więcej promienistym. Ze względu na swój zjonizowany charakter, plazma wypełniająca wnętrze kuli umożliwia łatwy przepływ prądu, co objawia się powstawaniem świetlnych strumieni. Z natury są one nieco nieregularne, ponieważ kula plazmowa ma tylko jedną elektrodę centralną, zatem prądy nie mają określonego kierunku, a raczej „błądzą”, szukając drogi rozładowania, podobnie jak błyskawice na niebie podczas burzy. Mechanizm rozświetlania gazu jest tutaj podobny do powstawania wyładowań w lampach fluorescencyjnych, czy neonowych, z tą jednak różnicą, że w lampach tych obecne są dwie elektrody i dlatego prądy (a także rozświetlone ścieżki) płyną pomiędzy nimi w liniach prostych i są regularne. Propagacja pola elektromagnetycznego poza obszar kuli powoduje wiele zaskakujących efektów, które można obserwować w domowych warunkach.

Badanie pola elektromagnetycznego¹

Zasady bezpieczeństwa

Kula plazmowa jest urządzeniem produkującym wysokie napięcie, dlatego należy obchodzić się z nią z należytą ostrożnością. W szczególności:

- Nie wolno przykrywać kuli, gdy jest ona włączona do prądu, gdyż łatwo ją przegrzać i spowodować np. pęknięcie.
- Należy unikać kontaktu metalowych obiektów z kulą plazmową. Metal może się szybko rozgrzać, a to z kolei może doprowadzić do przepalenia lub poparzenia.
- Kula plazmowa powinna pracować bez przegrzewania się przez przynajmniej 1 godzinę. Jeśli jednak zauważymy, że przegrzewa się w krótszym czasie, należy ją wyłączać pomiędzy eksperymentami.
- Do kuli plazmowej nie powinny się zbliżać osoby z rozrusznikiem serca, ponieważ pole elektromagnetyczne wytwarzane przez pracującą kulę zakłóca działanie takiego rozrusznika.

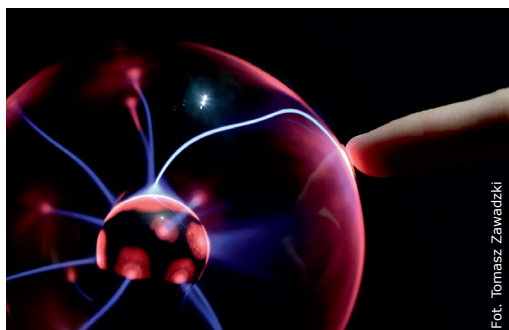
Eksperyment

Przygotuj: kulę plazmową, standardową diodę świecącą (LED), energooszczędną świetlówkę fluorescencyjną (kompaktową) o mocy kilkunastu watów, zwykłą żarówkę nieenergooszczędną (np. z włóknem wolframowym) o mocy kilkunastu watów, świetlówkę liniową o mocy kilkunastu watów, kwadrat z folii aluminiowej o wymiarach 1 cm × 1 cm, igłę do szycia.

Część 1. Dotknięcie palca

Jak wspomniano wcześniej, świetlne ścieżki rozchodzą się w kuli plazmowej mniej więcej promieniście, choć w sposób nieco nieregularny. Dążą one ku szklanej obudowie kuli plazmowej.

¹ Poniższy tekst powstał w oparciu o artykuł *Plasma: the fourth state*, Jorge Yanez Gonzalez, Science in School 37: Autumn 2016.



Fot. Tomasz Zawadzki

Pytania:

- A. Co się dzieje, gdy dotykamy jednym palcem obudowy kuli? Dlaczego?
- B. Co się dzieje, gdy dotkniemy obudowy kuli opuszkami kilku palców?

Objaśnienia:

Świetliste ścieżki zagęszczają się wokół palców, gdyż każdy z nich ma potencjał bliski 0V (czyli potencjał Ziemi). Zatem różnica potencjałów (napięcie) pomiędzy elektrodą centralną a każdym punktem czaszy kuli dotykanej przez człowieka jest większa niż pomiędzy elektrodą centralną a jakimkolwiek innym punktem na czaszy. Mechanizm jest tu analogiczny do uderzenia pioruna w Ziemię – błyskawica w swej wędrówce od chmury do Ziemi wybiera ścieżkę do miejsca, którego potencjał względem potencjału chmury jest największy (powstaje największe napięcie). Dotykając kuli plazmowej tworzymy zatem ścieżkę rozładowania elektrycznego o mniejszej oporności niż oporność szkła kuli, czy gazu wewnątrz niej.

Część 2. Dioda LED

Ten eksperyment ma na celu pokazanie, że diodę można zaświecić bez włączania jej w obwód elektryczny z baterią.

Przy włączonej kuli plazmowej przybliżamy diodę LED z dalszej odległości do szklanej sfery. Diodę należy trzymać za jeden z drucików (elektrod) z niej wystających. W pewnej odległości od kuli, dioda zaświeca się i świeci tym bardziej intensywnie, im bardziej przybliżamy ją do czaszy kuli.

Pytania:

- C. Jak to się dzieje, że dioda LED umieszczona w pewnej odległości od kuli plazmowej, zaczyna świecić?
- D. Dlaczego dioda LED nie zaświeca się, gdy znajduje się zbyt daleko od kuli plazmowej?
- E. Dlaczego dioda trzymana za dwa wystające z niej druciki lub za obudowę w ogóle się nie świeci?

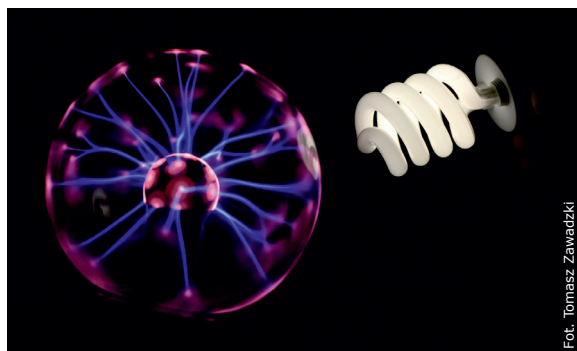
Objaśnienia:

Gdy dioda znajduje się daleko od kuli plazmowej, pole elektromagnetyczne wytwarzane przez kulę jest zbyt słabe, aby wpływać na diodę. Kiedy dioda zostanie zbliżona na odpowiednią odległość, pole elektromagnetyczne powoduje powstanie niezerowego potencjału na elektrodach diody. Jeśli trzymamy diodę

za jej obudowę, potencjał każdego z drucików jest w przybliżeniu ten sam, a zatem nie występuje napięcie (czyli różnica potencjałów). Jeśli natomiast trzymamy diodę za jedną z elektrod, tylko ta druga zyskuje niezerowe napięcie, spowodowane obecnością pola elektromagnetycznego. Natomiast elektroda, którą trzymamy w palcach zyskuje zupełnie inny potencjał, gdyż poprzez ludzkie ciało zostaje połączona z Ziemią. Powstaje zatem różnica potencjałów pomiędzy elektrodami diody, a to z kolei powoduje przepływ prądu. Gdy trzymamy w palcach obie elektrody, ponownie uzyskują one ten sam potencjał, gdyż obie poprzez ludzkie ciało są w ten sam sposób połączone z Ziemią. W takim przypadku prąd również nie płynie.

Część 3. Światłówka kompaktowa (fluorescencyjna)

Podobnie jak w części 1. zbliżamy światłówkę trzymając ją za gwint (jednak bez dotykania podstawy gwintu). Jasność świecenia wzrasta wraz ze zmniejszaniem się odległości światłówki od kuli.



Fot. Tomasz Zawadzki

Pytania:

- F. Czy istnieje jakaś maksymalna odległość światłówki od czaszy kuli, przy której światłówka zawsze się zaświeca?
- G. Co może się dzieć wewnątrz światłówki?

Objaśnienia:

Światłówki energooszczędne często są błędnie nazywane żarówkami. Nazwa *żarówka* używana w przeszłości do elementów świecących lamp pochodzi od sposobu ich funkcjonowania, który polegał na intensywnym żarzeniu się drucika (np. wolframowego) wewnątrz takiej żarówki pod wpływem przepływu prądu. Sposób działania światłówek energooszczędnych jest zgoła inny. Polega on na sekwencji wzbudzeń elektronów na wyższe poziomy energetyczne i ich powrotów do stanu niewzbudzonego z jednoczesną emisją promieniowania. Najpierw wzbudzone zostają elektrony w atomach gazu (najczęściej rtęci) znajdującego się wewnątrz lampy, a następnie - w procesie przechodzenia elektronów do ich podstawowych stanów energetycznych - emitowane jest promieniowanie ultrafioletowe (UV). Wzbudzenie może nastąpić w różny sposób, m.in. poprzez rozpędzanie elektronów, jak to ma miejsce, gdy żarówkę tego typu podłączymy do prądu. Emitowane promieniowanie UV (niewidzialne dla naszych oczu) wzbudza z kolei luminofor, którym pokryta jest od wewnątrz obudowa światłówki - i dopiero promieniowanie emitowane przez luminofor jest światłem widzianym przez nas jako światło światłówki.

Gdy świetlówka znajduje się w pobliżu kuli plazmowej dochodzi do wzbudzenia elektronów w atomach jej gazu na skutek przechodzenia przez świetlówkę promieniowania elektromagnetycznego z kuli. Zatem mimo braku podłączenia żarówki do prądu, luminofor pobudzony przez promieniowanie UV pochodzące od atomów gazu wewnątrz świetlówki, zaczyna świecić. Wzbudzenie następuje jednak dopiero po przekroczeniu pewnej energii minimalnej, dlatego zachodzi dopiero wtedy, gdy świetlówka znajdzie się w określonej odległości od czaszy kuli plazmowej.

Warto przeprowadzić tę część eksperymentu także ze starymi (już nie działającymi normalnie świetlówkami fluorescencyjnymi), gdyż w większości przypadków pole elektromagnetyczne pochodzące od kuli plazmowej jest wystarczające do ich zaświecenia. Dzieje się tak dlatego, iż świetlówki tego typu zawodzą najczęściej ze względu na popsuty mechanizm inicjujący świecenie przy podłączeniu ich do prądu. Natomiast wykorzystując pole elektromagnetyczne pochodzące z kuli plazmowej, omijamy ten mechanizm i inicjujemy wzbudzenia atomów rtęci niejako bezpośrednio.

Część 4. Żarówka z włóknem wolframowym

Ten sam eksperyment można powtórzyć z żarówką starego typu, posiadającą w swoim wnętrzu włókno wykonane z trudno topliwego materiału, który silnie świeci na skutek przepływu prądu.

Pytanie:

H. Czy istnieje jakaś maksymalna odległość świetlówki od czaszy kuli, przy której świetlówka zawsze się zaświeca?

Objaśnienia:

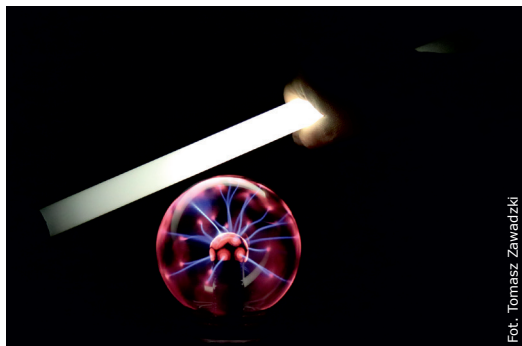
Żarówka z włóknem wolframowym potrzebuje znacznie więcej energii, dlatego nie udaje jej się zaświecić za pomocą pola elektromagnetycznego pochodzącego od kuli plazmowej.

Część 5. Świetlówka liniowa

Najbardziej zaskakujący efekt można zaobserwować po zbliżeniu świetlówki liniowej (rury) do kuli plazmowej. Kierując jeden koniec rury w stronę kuli, należy przesuwac dłoń wzdłuż rury.

Pytanie:

I. Która część świetlówki zaświeca się? Dlaczego?



Fot. Tomasz Zawadzki

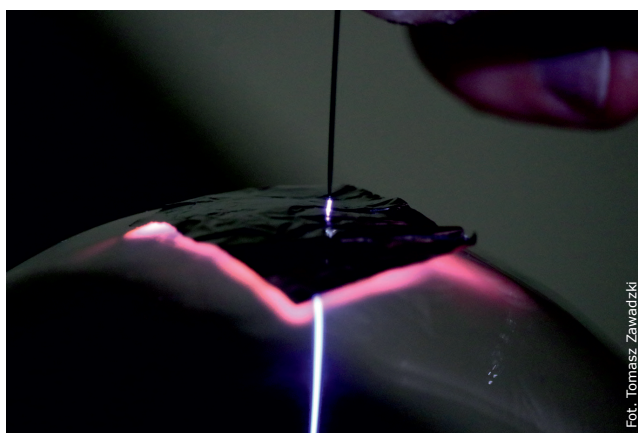
Objaśnienia:

Światłówka liniowa działa na tej samej zasadzie, co światłówka kompaktowa. Jak już wspomniano w części 1. Badania pola elektrycznego, potencjał dłoni jest bliski potencjałowi Ziemi. Zatem poprzez naszą dłoń tworzymy ścieżkę rozładowania elektrycznego wprost do Ziemi, o mniejszej oporności niż ścieżka przez pozostałą część gazu znajdującą się wewnątrz rury światłówki powyżej naszej dłoni.

Część 6. Mały łuk elektryczny

Po włączeniu kuli plazmowej i odczekaniu kilku minut, umieść kwadrat z folii aluminiowej na wierzchu czaszy kuli. Następnie bardzo powoli zbliżaj igłę do szycia w kierunku folii (nie dotykając jej!) Mniej więcej w odległości 0,5 cm powinien pojawić się pomiędzy folią a igłą mały **łuk elektryczny**.

Pamiętaj: nie trzymaj folii aluminiowej zbyt długo na kuli!



Objaśnienia:

Łuk elektryczny powstaje ponieważ folia aluminiowa jest dobrym przewodnikiem elektrycznym, a zmienne pole elektromagnetyczne wytwarzane przez kulę powoduje stopniowe gromadzenie ładunku elektrycznego na jej powierzchni. Tworzy się jakby **kondensator**, którego jedną przewodzącą okładką jest kawałek folii aluminiowej, a drugą – sama plazma, natomiast szkło obudowy kuli stanowi wypełnienie kondensatora z materiału nieprzewodzącego. Po zbliżeniu metalowej i nienaładowanej igły do folii (jednej z okładek kondensatora), elektrony gwałtownie przeskakują z folii na czubek igły, w celu zminimalizowania różnicy potencjałów pomiędzy dwoma materiałami – i w ten sposób kondensator gwałtownie rozładowuje się, czemu towarzyszy powstanie małego, świecącego wyładowania elektrycznego.

Czytaj więcej:

Czy można zaświecić światłówkę naelektryzowanym balonem?

<http://sciencewithkids.com/Experiments/Energy-Electricity-Experiments/Power-light-with-static-electricity.html>